

18. T. Ai, J. Masada, E. Ito. Development of the High Efficiency and Flexible Gas Turbine M701F5 by Applying “J” Class Gas Turbine Technologies// Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2014. – Vol. 51. – № 1. – P. 1–9.

19. Powering a new record at EDF. 9HA.01 sets efficiency world record [Электронный ресурс]. URL: https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/gas%20turbines/White%20Paper/gea32885-bouchain-whitepaper-final-aug-2016.pdf.

УДК 66.971

А. П. Скуратов, А. С. Потапенко, Н. П. Попиякова

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация

Рассмотрены особенности технологического процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов. Изложена разработанная на базе программного продукта Ansys CFX трехмерная математическая модель установки, позволяющая оценить динамику изменения теплового состояния элементов ее конструкции. Представлены результаты расчета теплообмена при реализации процесса литья и прессования алюминиевого сплава на опытной лабораторной установке.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье и прессование, компьютерная модель, теплообмен.

Abstract

There have being observed the parameters of technological process of non-ferrous metals continual casting & extrusion. The three-dimensional mathematical model of the continuous casting and extrusion installation has been designed with Ansys CFX software. The model helps to estimate dynamics of thermal state changes of the installation elements. There are the results of calculations of heat exchange while aluminum alloy casting and extrusion with the experimental laboratory installation.

Key words: installation, continuous casting and extrusion, computer model, heat exchange.

Введение

Процессы обработки цветных металлов и сплавов включают в себя такие основные металлургические переделы, как литье заготовки, пластическую деформацию и термообработку. Тенденцией развития металлургической отрасли является совмещение этих переделов в одну непрерывную технологическую линию.

Установки, реализующие энерго- и ресурсосберегающую технологию совмещения операций литья и обработки давлением, имеют разнообразные конструкции. Одной из таких машин является установка непрерывного литья и прессования (НЛиП) с горизонтальным карусельным кристаллизатором, разработанная сотрудниками кафедры обработки металлов давлением Сибирского федерального университета. Однако на сегодняшний день не создано промышленных образцов установок данной конструкции, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции. Связано это с тем, что начальный период работы, после пуска установки (переходный тепловой режим), характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов. При выходе же на стационарный тепловой режим существенное влияние на температурно-временные условия

затвердевания металла (динамику теплообмена) оказывает ряд внешних факторов, которые еще недостаточно изучены [1].

Очевидная перспективность процесса НЛиП цветных металлов в установке с горизонтальным кристаллизатором требует его скорейшего внедрения в отечественную промышленность. Вместе с тем, теоретической базы для проектирования рациональной конструкции и режимов работы установки, обеспечивающих стабильный и устойчивый процесс непрерывной кристаллизации жидкого металла и дальнейшего его прессования, в настоящее время еще недостаточно. Поэтому актуальной является задача проведения на базе современных математических моделей сложного теплообмена, теоретических исследований, направленных на изучение температурно-временных зависимостей процесса литья-прессования цветных металлов, которые позволят в дальнейшем надёжно эксплуатировать данный тип установки, представленной на рисунке 1.

Математическая модель

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения энергии. Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при обработке сплава в процессе кристаллизации и прессования. Для моделирования переноса хладагента решаются уравнения Навье-Стокса, сохранения массы и импульса.

Нелинейное трехмерное уравнение сохранения энергии для обрабатываемого металла и элементов установки записывалось в виде субстанциональной производной:

$$\rho_i c_i(T) \frac{dT_i}{d\tau} = \rho_i c_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + \rho_i c_i(T) w_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T) \nabla T_i) + q_{\text{вн}i}, \quad (1)$$

где $T_i = T_i(x, y, z, \tau)$ – поле температур в i -ом элементе; ρ_i , c_i и λ_i – плотность, объёмная теплоёмкость и теплопроводность i -го элемента; w_i – скорость движения i -го элемента вдоль оси z ; $q_{\text{вн}i}(x, y, z, \tau)$ – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в i -ом элементе.

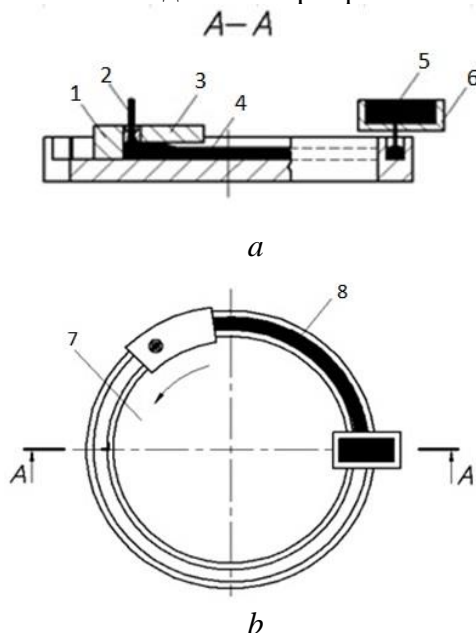


Рис. 1. Схема установки непрерывного литья и прессования с горизонтальным карусельным кристаллизатором [2]:

- а – вид сбоку: 1 – упор матрицы; 2 – пресс-изделие; 3 – неподвижный дугообразный сегмент; 4 – затвердевший слиток; 5 – расплав металла; 6 – дозатор.
 б – вид сверху: 7 – колесо-кристаллизатор; 8 – кольцевая канавка

Уравнение (1) дополняется краевыми условиями:

$T_i = T(x, y, z, \tau = 0) = T_{0i}(x, y, z); \lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = \pm q_i$ (q_i – условия радиационно-конвективного теплообмена на границе поверхности Γ i -го элемента установки; $q_i > 0$ – поток направлен внутрь элемента).

Так как расплав обрабатываемого металла проходит две теплотехнические зоны: зону кристаллизации расплава и зону прессования, внутренние тепловыделения для формулы 1 будут иметь вид:

$$S_h = S'_h + S''_h, \quad (2)$$

S'_h – внутренние тепловыделения при фазовом переходе, учитывается при решении уравнения теплопроводности в процессе кристаллизации расплава

S''_h – тепловыделения от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла, учитывается при решении уравнения теплопроводности для участка прессования

Учёт внутреннего источника тепловыделения при фазовом переходе расплава из жидкой фазы в твёрдую, входящего в величину $q_{\text{вн } i}$, осуществляется путём введения эффективного коэффициента теплоёмкости.

$$S'_h = \int_{T_{\text{liq}}}^{T_{\text{sol}}} c_p(T) dT + L. \quad (3)$$

В модели теплота затвердевания L отдельно не учитывалась, а включалась в величину эффективной теплоёмкости $c_{\text{эф}}$. Эта величина является разрывной энергетической характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в кристаллизующейся зоне от доли твёрдой фазы ψ . Принимая, что ψ зависит от локальной температуры T в условиях квазиравновесия, когда S'_h выделяется внутри интервала кристаллизации (такой способ решения задачи теплопроводности развит в работах Ю.А. Самойловича), можно записать

$$c_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} c_{\text{ж}} & \text{при } T > T_{\text{liq}}; \\ c_{\text{ж}}(1 - \psi) + c_{\text{т}}\psi + L \frac{\partial \psi}{\partial T} & \text{при } T_{\text{sol}} \leq T \leq T_{\text{liq}}; \\ c_{\text{т}} & \text{при } T < T_{\text{sol}}. \end{cases} \quad (4)$$

Отметим, что для уточнения решаемой задачи в уравнение (1) вводится величина эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$, который также считается функцией доли твердой фазы ψ :

$$\lambda_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} \lambda_{\text{ж}} & \text{при } T > T_{\text{liq}}; \\ \lambda_{\text{ж}}(1 - \psi) + \lambda_{\text{т}}\psi & \text{при } T \leq T_{\text{liq}}; \\ \lambda_{\text{т}} & \text{при } T < T_{\text{sol}}. \end{cases} \quad (5)$$

Учёт тепловыделения от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла учитывался в модели за счёт добавления объёмного источника теплоты:

$$S''_h = q_{\text{тр}} + q_{\text{д}}. \quad (6)$$

Здесь $q_{\text{тр}}$ – тепловыделения от преодоления сил контактного трения с неподвижным инструментом и стенками кристаллизатора (поверхностный источник тепловыделений); $q_{\text{д}}$ – тепловыделения от работы пластической деформации (объёмный источник тепловыделений).

Для расчета $q_{\text{д}}$ воспользовались формулой для прессования с боковым истечением деформируемого металла:

$$q_{\text{тр}} = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)(1,45\lambda + 0,8)b^2\lambda\nu_0, \quad (7)$$

где λ – коэффициент вытяжки; b – ширина канавки колеса; ν_0 – скорость подачи заготовки в контейнер; $\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)$ – сопротивление деформации материала заготовки.

Теплота от преодоления сил трения определяется выражением:

$$q_{\text{тр}} = 4b \cdot \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)\mu \cdot R \cdot \varphi \cdot \nu_0, \quad (8)$$

где R – средний радиус по ширине канавки колеса; μ – коэффициент трения.

Для изучения тепловой работы разработана трехмерная компьютерная модель с использованием программного продукта SolidWorks (рис. 3).

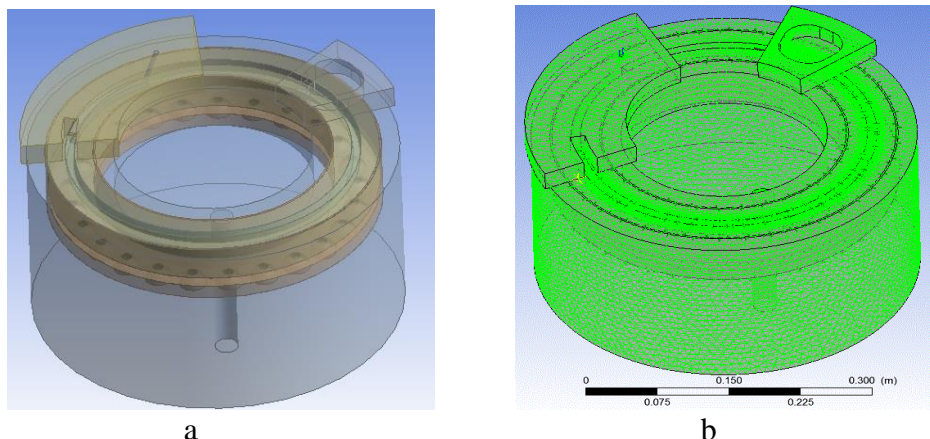


Рис. 2. Трёхмерная компьютерная модель установки НЛиП:
а – геометрия установки; б – расчётная сетка контрольных объёмов

Полученная геометрия была импортирована в расчётный модуль Ansys CFX, где производилось численное исследование тепловой работы установки.

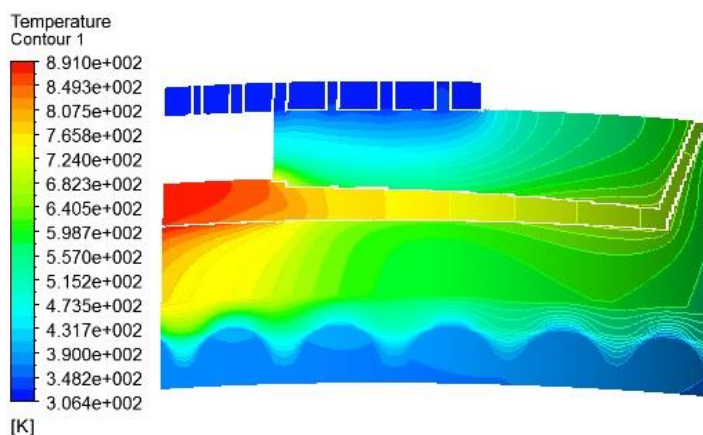


Рис. 3. Распределение температуры элементов установки НЛиП
с горизонтальным карусельным кристаллизатором в сечении зоны прессования

Результаты расчёта

На основе результатов расчетно-теоретического анализа предложено конструкцию установки, условно, разделить на пять теплотехнических зон, характеризующихся различной степенью теплообмена в период от холодного пуска до момента стабилизации температуры всех ее элементов: внешнего подвода теплоты; кристаллизации металла; прессования металла; конвективного теплообмена кристаллизатора с окружающей средой; контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками. Первые три зоны являются зонами подвода теплоты, две остальные – отвода теплоты к элементам конструкции установки и в окружающую среду.

В ходе расчётов проведённых на базе программного продукта Ansys CFX [3–4], было определено, что элементы установки сильно перегреваются, в результате чего в зоне контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками выгорает смазка и дальнейшая эксплуатация становится невозможной. Поэтому с целью повышения надёжности и работоспособности установки, в корпусе рядом с подшипниками закладываются кольцевые профилированные каналы. Между кристаллизатором и подшипниками выполнена изоляционная прослойка из оксидалюминиевой керамики. В результате внедрения указанных мероприятий

работоспособность установки НЛиП не вызывает затруднений. Распределение температуры элементов установки после реализации предложенных решений представлено на рисунке 3.

Для исключения перегрева элементов установки и нарушения технологического процесса НЛиП сплава АК-12 (при стационарном тепловом режиме) необходимо обеспечить массовый расход воды в змеевике, расположенном на дугообразном сегменте, 0,1252 кг/с, в кольцевых профилированных каналах, расположенных в корпусе (внешнем и внутреннем), – 0,0586 кг/с. При таком режиме охлаждения соблюдаются условия технологического процесса: температура сплава перед попаданием под дугообразный сегмент не превышает точку солидуса, прутка на выходе из матрицы – 427 °С.

Список использованных источников

1. Горохов Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 268 с.
2. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.
3. Скуратов А.П. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме / А.П. Скуратов, А.С. Потапенко, Ю.В. Горохов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 337–345.
4. Потапенко А.С. Моделирование теплового процесса в установке совмещённого литья и прессования цветных металлов / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, А.А. Пьяных // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Красноярск 15–25 апреля 2014 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014.

УДК 669.162.263

Н. А. Спирин, В. С. Швыдкий, В. В. Лавров

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И АГРЕГАТОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация

В докладе отражен обзор основных подходов и принципов разработки математических моделей применительно к слоевым металлургическим процессам и агрегатам, которые являются основой современных информационных систем в металлургии. Показано, что несмотря на широкую информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей теплофизических процессов остаются слабо заполненными, что связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплофизические процессы, шахтные печи, доменный процесс, информационные системы.

Abstract

The report reflects an overview of the main approaches and principles for the development of mathematical models for layered metallurgical processes and aggregates, which are the basis of